

ANALISA REMBESAN PADA BENDUNGAN TIPE URUGAN HOMOGEN DENGAN KEMIRINGAN 30 DERAJAT MELALUI PEMODELAN FISIK

Amelia Setyaningtyas

Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

setyaningtyasamelia@gmail.com

Kusnan

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

cwiksn@yahoo.co.id

Abstrak

Salah satu masalah yang sering terjadi pada bendungan adalah adanya aliran rembesan air pada tubuh bendungan tersebut. Dengan demikian, analisis rembesan perlu dilakukan guna mengamati bentuk pola aliran rembesan dan debit rembesan dari tubuh bendungan tersebut. Dalam penelitian ini, model fisik bendungan urugan homogen direncanakan berbentuk trapesium, kemiringan lereng 30 derajat dengan tingkat kepadatan 90 persen. Dimensi bendungan ini adalah 3200 cm, tinggi 880 cm, dan lebar samping 1760 cm. Drainase terpasang sepanjang 1200 cm dan tinggi 80 cm dibagian hilir bendungan dengan bahan pasir berkerikil. Variasi tinggi air tampungan yakni 800 cm, 700 cm, 600 cm, 500 cm, 400 cm, 300 cm, dan 260 cm. Variasi ini dilakukan dalam rangka mempelajari pengaruh tinggi air tampungan terhadap pola rembesan air.

Berdasarkan sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) bahwa tanah diklasifikasikan sebagai tanah SP (tanah berpasir bersih) dengan koefisien permeabilitas sebesar $2,04 \times 10^{-3}$ cm/detik. Hasil pengujian tanah tersebut digunakan dalam perhitungan debit rembesan dengan tiga metode perhitungan, yaitu metode empiris (model fisik), metode *Casagrande*, dan *software Geo Studio 2012 Seep/w Student Version*. Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini semakin tinggi air tampungan dibagian hulu semakin tinggi, maka debit rembesan yang dihasilkan di bagian hilir akan semakin besar. Sebaliknya, apabila air tampungan di bagian hulu rendah, maka debit rembesan yang dihasilkan dibagian hilir akan kecil.

Kata Kunci: Rembesan, Bendungan Urugan Homogen, Model Fisik, *Casagrande*, *Geo Studio 2012 Seep/w Student Version*.

Abstract

One problem that often occurs in dams is the flow of water seepage on the body of the dam. Thus, seepage analysis needs to be used to observe the seepage flow pattern and the seepage discharge from the dam's body. In this research, the physical model of a homogeneous fill dam planned in trapezoidal form, the slope of 30 degrees with 90 percent density level. The dimensions of this dam are 3200 cm, height 880 cm, and side width 1760 cm. The drainage installed in the downstream of the dam within 1200 cm of the length and 80 cm of height which used gravel sand material. The variations heights of storage water are 800 cm, 700 cm, 600 cm, 500 cm, 400 cm, 300 cm, and 260 cm. This variation carried out to study the effect height on water seepage patterns.

*Based on the USCS (Unified Soil Classification System) is that the soil classified as SP (clean sandy soil) with a permeability coefficient of 2.04×10^{-3} cm/sec. The results of soil testing are being used in the calculation of seepage discharge by three methods, namely the empirical method (physical model), *Casagrande* method, and *Geo Studio 2012 Seep/w software*. The conclusion of this research that the higher the storage water in upstream, the seepage discharge downstream will be high. Otherwise, if the storage water in upstream is low, then the seepage discharge downstream will be small.*

Keyword: *Seepage, Homogeneous Fill Dam, Physical Model, Casagrande, Geo Studio 2012 Seep/w Student Version.*

PENDAHULUAN

Bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan/atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang tambang (*failing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (SNI 8062:2015). Selain itu, fungsi bendungan sendiri tidak hanya sebagai menahadan dam menampung air, tetapi bendungan dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan, antara lain mengembangkan areal rigasi dan meningkatkan intensitas tanaman dari areal irigasi yang telah ada, pembangkit tenaga listrik, pariwisata, perikanan, penyediaan air baku, dan lain sebagainya.

Suatu bendungan yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan - bahan seperti: batu, krakal, kerikil, pasir, dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi sebagai pengempang atau pengangkat permukaan air yang terdapat di dalam waduk di udiknya disebut bendungan tipe urugan. Suatu bendungan urugan digolongkan dalam tipe homogen, apabila bahan yang membentuk tubuh bendungan tersebut terdiri dari tanah yang hampir sejenis dan gradasinya (susunan ukuran butirannya) hampir seragam (Sosrodarsono & Kensaku, 1981).

Salah satu masalah yang sering terjadi pada bendungan adalah adanya aliran rembesan air pada tubuh bendungan tersebut. Rembesan air dapat terjadi pada saat bangunan tersebut harus mengatasi beda tinggi permukaan air dan apabila terjadi aliran air yang meresap ke dalam tanah disekitar bangunan. Tekanan aliran rembesan air yang ada akan berangsur berkurang sampai pada tekanan minimum di bagian hulu bendungan.

Pada penelitian ini, tipe bendungan yang akan digunakan adalah bendungan tipe urugan. Keistimewaan bendungan urugan yakni pembangunan dapat dilaksanakan pada hampir semua kondisi geologi dan geografi yang dijumpai, serta bahan untuk tubuh bendungan dapat digunakan batuan yang terdapat di sekitar calon bendungan (Sosrodarsono & Kensaku, 1981). Bendungan Tugu Trenggalek, Jawa Timur adalah lokasi pengambilan material untuk tubuh bendungan yang akan digunakan untuk model fisik. Material tanah yang digunakan adalah lempung dan pasir. Pengambilan material tanah dari Trenggalek ini didasarkan atas pertimbangan kemudahan dalam pengambilan material dan material tanah ini telah dilakukan pengujian sebelumnya dan hasil pengujian tersebut telah sesuai dengan standart yang disyaratkan

dalam SNI 8064:2016. Dalam perencanaan bendungan pasti diperhitungkan keamanan bendungan terhadap rembesan air yang mengalir melalui celah - celah diantara butiran tanah bendungan. Untuk mengetahui bagaimana pola aliran rembesan air yang terjadi pada tubuh bendungan tipe urugan homogen serta debit rembesan yang terjadi, maka dari itu perlu kajian mengenai permasalahan tersebut. Dengan adanya dukungan uji pemodelan fisik ini diharapkan dapat memperkirakan bagaimana pola aliran rembesan air yang sebenarnya terjadi pada bendungan.

KAJIAN PUSTAKA

A. Bendungan

Berdasarkan SNI 8062:2015, bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan/atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk.. Sebuah bendungan dapat dibuat dari material bangunan urugan tanah campuran batu berukuran kecil sampai besar atau dari beton. Bendungan berfungsi sebagai penangkap air dan menyimpannya di musim hujan waktu air sungai mengalir dalam jumlah besar dan yang melebihi kebutuhan baik untuk keperluan irigasi, air minum, industri dan sebagainya. Dengan memiliki daya tampung tersebut, sejumlah besar air sungai yang melebihi kebutuhan dapat disimpan dalam waduk dan baru dilepas mengalir ke dalam sungai lagi di hilirnya sesuai dengan kebutuhan pada saat diperlukan. Bilamana aliran air sungai yang masuk ke dalam waduk tersebut melebihi air yang dialirkan ke luar waduk sesuai dengan kebutuhan, maka isi waduk makin lama makin penuh dan dapat melampaui batas daya tampung rencananya, sehingga permukaan air dalam waduk akan naik terus dan akhirnya melimpas.

B. Bendungan Urugan

Suatu bendungan yang dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan seperti batu, krakal, kerikil, pasir, dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi sebagai pengempang atau pengangkat permukaan air yang terdapat di dalam waduk di udiknya disebut dengan bendungan tipe urugan atau bendungan urugan (Sosrodarsono & Kensaku, 1981).

Berdasarkan SNI 8062:2015 pasal 3.3, bendungan urugan adalah bendungan yang terbuat dari bahan

urugam dari borrow area yang dipadatkan dengan menggunakan vibrator roller atau alat pemadat lainnya pada setiap hamparan dengan tebal tertentu.

Sehubungan dengan fungsinya sebagai pengempang air atau pengangkat permukaan air di dalam suatu bendungan, maka secara garis besarnya tubuh bendungan merupakan penahan rembesan air ke arah hilir serta penyangga tandonan air tersebut (Sosrodarsono & Kensaku, 1981). Untuk klasifikasi umum bendungan urugan dapat dilihat pada gambar 1.

Type:	Skema Umum	Keterangan
Bendungan Homogen		Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.
Bendungan Tiral		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkap dengan tiral kedap air di udiknya.
Bendungan Zonal		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkap dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.
Bendungan Inti miring		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkap dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.
Bendungan Sekat		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkap dengan dinding tidak lulus air di lereng udiknya yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal betor lembaran plastik, dll. nya.

Gambar 1. Klasifikasi Umum Bendungan Urugan
Sumber : Sosrodarsono & Kensaku (1981)

C. Tanah

Menurut Das (1993, 79) menyatakan bahwa tanah adalah merupakan susunan butiran padat dan pori – pori yang saling berhubungan satu sama lain sehingga air dapat mengalir dari satu titik yang mempunyai energi lebih tinggi ke titik yang mempunyai energi lebih rendah. Studi mengenai aliran air melalui pori – pori tanah diperlukan dalam mekanika tanah karena hal ini sangat berguna di dalam memperkirakan jumlah rembesan air dalam tanah, menyelidiki permasalahan – permasalahan yang menyangkut pemompaan air untuk konstruksi di bawah tanah dan menganalisis kestabilan dari suatu bendungan tanah dan konstruksi dinding penahan tanah yang terkena gaya rembesan.

D. Permeabilitas

Kemampuan fluida untuk mengalir melalui media yang *porous* merupakan sifat teknis yang disebut daya rembesan (permeabilitas), dimana fluida itu air dan

media *porous* merupakan massa tanah (E. Sutarman, 2013). Pada massa tanah alamiah di mana ruang kosong antarbutir (ruang pori) merupakan jalan yang dilalui air berupa rembesan, semakin kecil ruang pori maka semakin kecil pula rembesan yang terjadi. Permeabilitas adalah sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air mengalir lewat rongga pori. Di dalam tanah, sidat aliran mungkin laminar atau turbulen. Tahanan terhadap aliran bergantung pada jenis tanah, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, serta bentuk geometri rongga pori. Koefisien permeabilitas tiap – tiap tanah bernilai variasi. Karena tanah termasuk bahan yang *permeable* sehingga air dapat mengalir melalui pori – pori tanah maka uji permeabilitas dengan tinggi energi turun atau *falling – head* lebih cocok digunakan untuk tanah berbutir halus. Sedangkan untuk tanah berbutir kasar menggunakan metode *constant head*.

Koefisien permeabilitas terutama tergantung pada ukuran rata – rata pori yang dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, bentuk partikel, dan struktur tanah. Secara garis besar, makin kecil ukuran partikel, makin kecil pula ukuran pori dan makin rendah koefisien permeabilitasnya. Berarti suatu lapisan tanah berbutir – kasar mengandung butiran – butiran halus memiliki harga k yang lebih rendah daripada tanah ini, koefisien permeabilitas merupakan fungsi dari angka pori. (Craig, R.F, 1994).

Tabel 1. Harga – Harga k untuk Berbagai Jenis Tanah

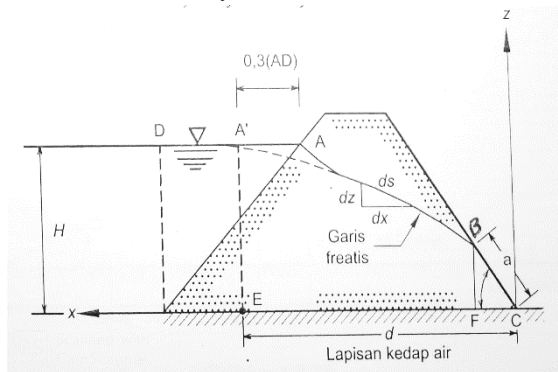
Jenis Tanah	Koefisien Permeabilitas (cm/det)
Kerikil bersih	1,0
Pasir Kasar Bersih	$1,0 - 10^{-2}$
Pasir campuran lempung, lanau	$10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$
Pasir halus	$5 \times 10^{-2} - 10^{-3}$
Pasir kelanauan	$2 \times 10^{-3} - 10^{-4}$
Lanau	$5 \times 10^{-4} - 10^{-5}$
Lempung	$10^{-6} - 10^{-9}$

E. Debit Rembesan dan Pola Aliran Rembesan Air Pada Tubuh Bendungan

a. Perhitungan Menggunakan Metode Casagrande

Metode casagrande (1937) memberikan cara untuk menghitung rembesan lewat tubuh bendungan yang berasal dari pengujian model. Parabola AB berawal dari titik A' seperti yang diperlihatkan pada gambar, dengan $A'A = 0,3 \times AD$. Pada modifikasi ini, nilai d yang digunakan dalam

persamaan akan merupakan jarak horizontal antara titik E dan C (Hardiyatmo, 2006).



Gambar 2. Hitungan Rembesan Cara Casagrande
Sumber : Hardiyatmo (2006)

Pada Gambar 2., ujung tumit hilir bendungan dianggap sebagai titik permulaan koordinat dengan sumbu - sumbu x dan y, maka garis depresi (pola aliran) diperoleh dengan persamaan parabola bentuk dasar sebagai berikut:

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (1)$$

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (2)$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (3)$$

Dimana:

h = jarak vertikal antara titik A dan B

d = jarak horizontal antara titik B₂ dan A

l₁ = jarak horizontal antara titik-titik B dan E

l₂ = jarak horizontal antara titik-titik B dan A

A = ujung tumit hilir bendungan

B = titik perpotongan antara permukaan air waduk dan lereng udik bendungan

A₁ = titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis depresi dengan garis vertikal melalui titik B.

B₂ = titik yang terletak sejauh 0.3l₁, horizontal ke arah udik dari titik B

Dengan kesalahan sebesar kira - kira 4 - 5 %, s dapat dianggap merupakan garis lurus A'C, maka,

$$s = \sqrt{(d^2 + H^2)} \quad (4)$$

Kombinasi persamaan memberikan

$$a = \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)} \quad (5)$$

Besarnya debit rembesan dapat ditentukan dengan persamaan

$$q = kasin^2 \alpha \quad (6)$$

b. Perhitungan Menggunakan Metode Empiris (Model Fisik)

Debit rembesan yang terjadi di bagian hilir dari tubuh bendungan berdasarkan uji model fisik (empiris), pengamatannya dilakukan pengukuran dengan sarana gelas ukur yang digunakan untuk mendapatkan volume (m³) dan stop watch untuk menghitung waktu (detik). Untuk pola aliran rembesan dilakukan dengan pembacaan pipa piezometer sebanyak 11 buah dari hulu ke hilir.

c. Perhitungan Menggunakan Metode Geo Studio 2012 Seep/w

Debit rembesan dan pola aliran rembesan air pada *software* Geo Studio 2012 Seep/w didapatkan setelah menganalisis data yang diinputkan kedalam program tersebut.

F. Geo Studio 2012

Geo Studio merupakan *software* atau program yang dirancang untuk digunakan pada bidang geoteknik dan *modeling geo-environment*. *Software* ini melingkupi *SLOPE/W*, *SEEP/E*, *SIGMA/W*, *QUAKE/W*, *TEMP/W*, dan *CTRAN/W*. Yang sifatnya terintegrasi sehingga memungkinkan untuk menggunakan hasil dari satu produk ke dalam produk lainnya. Fitur yang kuat ini sangat memperluas jenis masalah yang dapat dianalisis dan diberikan fleksibilitas untuk memperoleh modul seperti yang dibutuhkan untuk proyek yang berbeda. Setiap program yang tersedia di *Geostudio* ini memiliki manfaat yang berbeda - beda, seperti:

- 1) *Slope/w* adalah program untuk menghitung faktor keamanan dan stabilitas lereng.
- 2) *Seep/w* adalah program guna memperhitungkan rembesan bawah tanah.
- 3) *Sigma/w* adalah program guna menganalisa tekanan geoteknik dan masalah deformasi.
- 4) *Quake/w* adalah program guna menganalisa gempa bumi yang berpengaruh terhadap perilaku tanggul, lahan, kerimiringan lereng.
- 5) *Temp/w* adalah program guna menganalisis masalah *geothermal* atau panas bumi.
- 6) *Ctran/w* adalah program yang dalam penggunaannya berhubungan dengan *seep/w* untuk pemodelan transportasi kontaminasi seperti pergerakan partikel dalam gerakan air.

G. Pemodelan

Pada umumnya literatur tentang model sepakat untuk mendefinisikan kata “model” sebagai suatu representasi atau formalisasi dalam bahasa tertentu (yang disepakati) dari suatu sistem nyata (Simatupang, 1995). Adapun sistem nyata adalah sistem yang sedang berlangsung dalam kehidupan, sistem yang dijadikan titik perhatian dan dipermasalahkan. Dengan demikian, pemodelan adalah proses membangun atau membentuk sebuah model dari suatu sistem nyata dalam bahasa formal tertentu. Namun, model ini tidak mudah dikomunikasikan dengan orang lain. Untuk mempermudahnya dibutuhkan suatu alat komunikasi tertentu yang sama – sama dimengerti oleh dua atau lebih pihak yang berkomunikasi. Alat – alat komunikasi ini umumnya berbentuk bahasa tertulis seperti uraian verbal, simbol – simbol, huruf, grafik, angka, gambar, dan sebagainya, atau berupa wujud fisik.

Model fisik hidrolik adalah suatu bentuk pengecilan (miniatur) dari suatu bangunan, dimana konsep secara menyeluruh oleh Dieterich J. Schuring (1997), bahwa skala diuji coba pada miniatur model fisik (eksperimen) seperti kondisi sebenarnya (prototipe) dengan memperhatikan faktor yang ada di prototipe keadaan sama, dengan faktor yang di alat rancang bangun model fisik, sebagaimana dikemukakan oleh Priyantoro (1997) berprinsip membentuk kembali masalah – masalah yang ada prototipe kedalam skala yang lebih kecil. Berikut adalah macam – macam kesebangunan model, yakni:

a. Kesebangunan Geometris, artinya bentuk dari model dan prototipe adalah sama, maka untuk mewujudkan model miniatur dari prototipe ini perlu satuan dan besaran yang digunakan: m = model, p = prototipe, r = ratio dan skala n *ratio* antara masing – masing parameter yang ada pada prototipe dan model

Perbandingan besaran yang homolog dalam bentuk kesebangunan sehingga m = model, p = prototipe, r = ratio. Rumus kesebangunan geometris adalah sebagai berikut:

$$\text{Panjang, } L/L_m = L_r \quad (7)$$

$$\text{Luas, } A_p/A_m = L_r^2 \quad (8)$$

$$\text{Volume, } I_p/I_m = L_r^3 \quad (9)$$

b. Kesebangunan Kinematis, artinya kesebangunan dalam gerakan. Bila suatu sebangun geometris maka rasio kecepatan dari partikel yang homolog sama besar. Waktu, $T_p/T_m = T_r$ (10)

$$\text{Kecepatan, } V_p/V_m = \frac{L_p/T_p}{L_m/T_m} = L_r/T_r = V_r \quad (11)$$

$$\text{Percepatan, } a_p/a_m = \frac{L_p^2/T_p^2}{L_m^2/T_m^2} = \frac{L_p/T_p}{T_m^2/T^2} \quad (12)$$

$$\text{Debit, } Q_p/Q_m = \frac{L_p^3/T_p}{L_m^3/T_m} = \frac{L_p^3/T_p^3}{T_m/T_p} = L_r^3/T_r \quad (13)$$

c. Kesebangunan Dinamis, kesebangunan gaya. Gaya yang terjadi bila dalam gerakannya sebangun kinematis dan rasio dari massa yang bergerak serta yang menyebabkan dari partikel yang sudah homolog sama besarnya.

d. Skala Model, ditetapkan setelah diketahui karakteristik prototipe yang akan dimodelkan, maka dipilih skala model sama (*Undistorted Model*) atau skala model tidak sama (*Distorted Model*). Skala model tanpa distorsi yaitu penyekalaan untuk ukuran horizontal dan ukuran vertikal adalah sama. Perbandingan antara model dan prototipe didasarkan kesebangunan “*Froude*”. Menurut Indratmo S dan Martono (1995), sebuah model dan prototipe disebut sebangun jika mempunyai angka *Froude* yang sama besarnya.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (7)$$

Dimana: Aliran di model sama dengan prototipe

$$Fr(p) = Fr(m)$$

$$V = \text{kecepatan (m/dt)}$$

$$L = \text{panjang (m)}$$

$$g = \text{gaya gravitasi (m/dt}^2\text{)}$$

$$\frac{V_p}{\sqrt{g p \times L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g m \times L_m}} \quad (14)$$

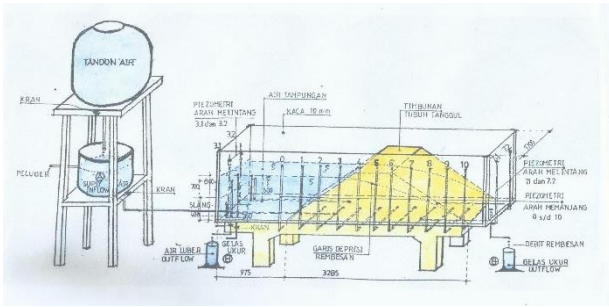
Jika $g_p = g_m$, maka:

$$\frac{V_p}{\sqrt{L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{L_m}} \quad (15)$$

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{\sqrt{L_p}}{\sqrt{L_m}} = L_n^{1/2} \quad (16)$$

H. Kalibrasi

Kalibrasi adalah proses pengecekan dan pengaturan akurasi dari alat ukur. Serta pengaturan model agar data yang ada di prototip sesuai dengan yang ada di model. Kalibrasi diperlukan untuk memastikan bahwa hasil pengukuran yang dilakukan akurat dan konsisten dengan instrumen lainnya. Saat simulasi ini dinyatakan selesai pembacaan bila posisi saat waktu pelaksanaan uji coba alat rancang bangun model fisik debit yang merembes ditambah luberan sebagai *outflow* telah sama dengan debit air *inflow* (volume tampungan) serta menunjukkan keadaan konstan atau stabil. Untuk sketsa pemodelan dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Sketsa Pemodelan
Sumber : Kusnan (2009)

METODE

A. Umum

Metode penelitian adalah langkah – langkah rencana dari suatu proses berfikir guna memecahkan suatu masalah dimulai dari tahap penelitian, kemudian pendahuluan, penemuan masalah, pengamatan, pengumpulan data, pengolahan data hingga penarikan kesimpulan atas permasalahan yang diteliti. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif yang mana lebih menekankan pada aspek pengukuran secara objektif terhadap fenomena sosial. Hasil akhir dari penerapan metode ini adalah berupa grafik dan hasil perhitungan.

B. Konsep Penelitian

Dalam penelitian ini, konsep yang digunakan adalah dengan menganalisa pengaruh pola aliran pada bendungan tipe urugan homogen. Untuk mengetahui perbedaan aliran yang dihasilkan serta pengaruhnya terhadap tubuh bendungan, maka dibuat variasi tinggi air tampungan. Variasi tinggi air tampungan yang digunakan adalah 800 cm, 700 cm, 600 cm, 500 cm, 400 cm, 300 cm, dan 260 cm (skala model yakni 20 cm, 17,5 cm, 15 cm, 12,5 cm, 10 cm, 7,5 cm dan 6,5 cm). Kemiringan bendungan dibuat melalui tiga variasi kemiringan pada lereng model bendungan, yaitu 30°. Serta, tingkat kepadatan tanah direncanakan menggunakan 90%.

C. Variabel Penelitian

Variabel bebas adalah variabel yang dibuat bebas dan dipilih oleh peneliti untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diamati. Variasi tinggi air tampungan yang digunakan sebagai pembanding adalah 800 cm, 700 cm, 600 cm, 500 cm, 400 cm, 300 cm, dan 260 cm (skala model yakni 20 cm, 17,5 cm,

15 cm, 12,5 cm, 10 cm, 7,5 cm dan 6,5 cm) , sehingga dapat mempengaruhi pola rembesan dan debit rembesan yang terjadi.

D. Langkah - Langkah Penelitian

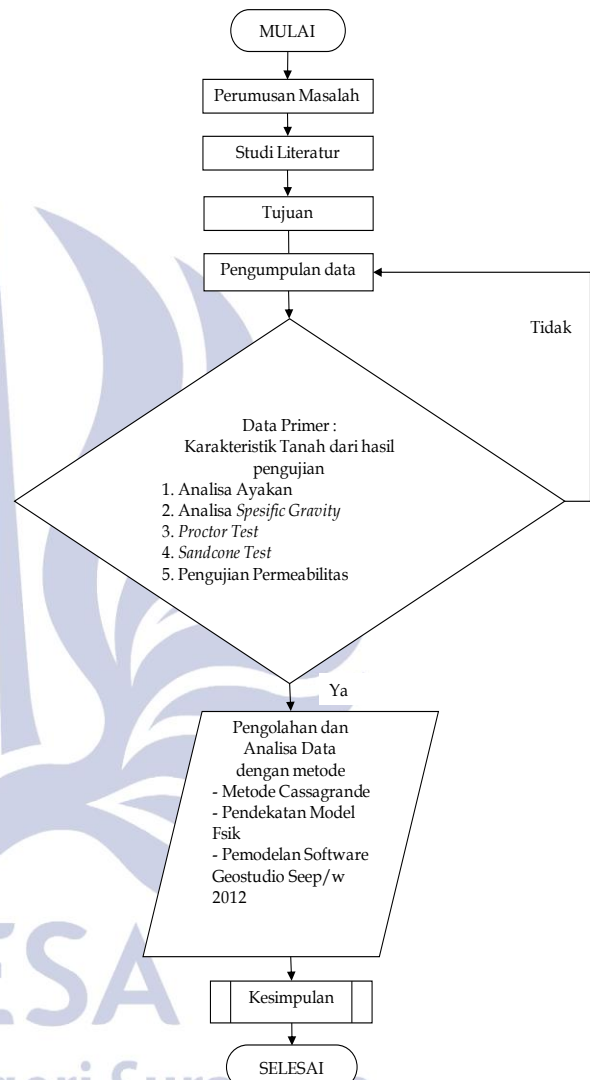


Diagram 1. Flowchart Penelitian

E. Pembuatan Model

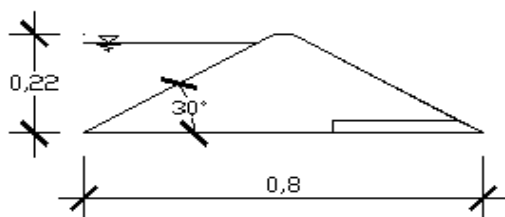
Pemodelan ini menggunakan tanah dengan campuran pasir dan lempung. Material timbunan diambil dari Trenggalek, Jawa Timur.

Pembuatan model dilakukan sebagai berikut:

- Siapkan peralatan utama pemodelan ini, yakni Menara Tandon air dan Alat kotak rancang bangun model fisik. Alat kotak rancang bangun model fisik ini sudah ada dan terletak di Laboratorium Kearian

Teknik Sipil Universitas Negeri Surabaya. Nantinya akan di rekayasa sedemikian rupa menyesuaikan penelitian yang akan dilakukan. **Alat tersebut hanya sebagai sarana pengujian penelitian ini.**

- b. Untuk alat model fisik ini memiliki ukuran 120 cm x 44 cm x 37 cm dengan ketebalan kaca 10 mm. Dipasang selang – selang yang berfungsi sebagai piezometer pada dinding arah memanjang kaca sebanyak 11 buah dengan jarak setiap selang 6 cm.
- c. Menyiapkan material timbunan. tanah sebelumnya harus dikeringkan alami dengan bantuan sinar matahari agar mendapatkan kering permukaan.
- d. Melakukan pengujian sampel tanah di Laboratorium Mekanika Tanah.
- e. Material tanah timbunan kemudian diletakkan pada alat model fisik untuk dibentuk menjadi bendung berbentuk trapesium. Kemiringan yang digunakan adalah 30° di setiap sisinya.
- f. Pembentukan bendung dilakukan dengan pemadatan setiap 2 cm ditumbuk dengan alat penumpuk, kemudian setelah terbentuk trapesium
- g. Alat kotak uji model fisik yang terisi timbunan bendung dialiri air tampungan yang berasal dari menara tandon air.
- h. Selang – selang yang berfungsi sebagai piezometer dipasang pada dinding arah memanjang kaca sebanyak 11 buah. Pembacaan dilakukan pada tiap – tiap ketinggian air tambungan mulai 260 cm, 300 cm, 400 cm, 500 cm, 600 cm, 700 cm dan 800 cm (skala model yakni 6,5 cm, 7,5 cm, 10 cm, 12,5 cm, 15 cm, 17,5 cm dan 20 cm).
- i. Proses pembacaan dimulai pada saat keadaan stabil dimana akan dicapai apabila dalam proses pengisian tampungan (Q_i) dan rembesan (Q_d) kondisinya harus seimbang. Artinya debit yang merembes ditambah luberan sebagai *outflow* telah sama dengan air di *inflow*, maka menunjukkan keadaan konstan. Dengan keadaan keseimbangan air itu maka garis aliran rembesan air yang terbentuk juga mengalami kestabilan.



Gambar 4. Desain Rencana Bendungan
Sumber : Dokumen Pribadi

- j. Pembuatan model bendungan di dalam *Software Geo Studio 2012 Seep/w Student Version*. Dimana data perencanaan dan hasil pengujian disamakan dengan model fisik yang ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Fisik Tanah

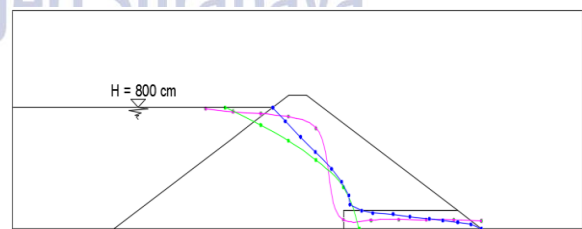
Dari serangkaian pengujian sifat fisik dasar tanah modifikasi dapat dilihat pada tabel 2 mengenai karakteristik tanah modifikasi.

Tabel 2. Karakteristik Tanah Modifikasi

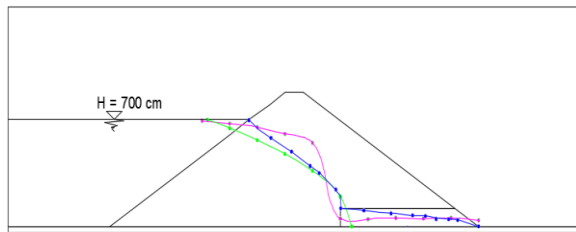
Karakteristik	Nilai
Kepadatan Tanah Laboratorium (<i>Proctor Test</i>)	1.934 gr/cm ³
Kepadatan Tanah Lapangan (<i>Sand Cone Test</i>)	1.757 gr/cm ³
Uji Berat Jenis Tanah (<i>Specific Gravity Test</i>)	2,939
Uji Permeabilitas (<i>Permeability Test</i>)	2,04x10 ⁻³ cm/dt
Analisa Ayakan	Gravel = 0% Sand = 95,74 % Silt + Clay = 4,26%
Jenis Tanah (USCS)	SP
Derajat Kepadatan	90.85 %

B. Perbandingan Gambar Pola Aliran Rembesan

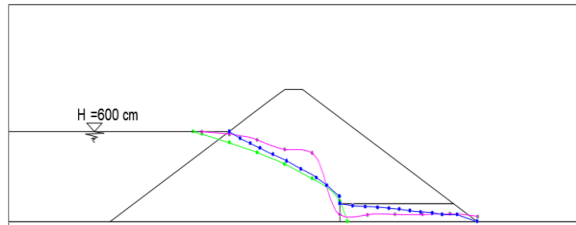
Pada penelitian ini, hasil gambar pola aliran rembesan yang akan dibandingkan adalah metode *Casagrande*, Empiris, dan *Geo Studio Seep/w 2012*. Untuk hasil gambar pola aliran metode *Casagrande* ditunjukkan dengan garis hijau, hasil perhitungan empiris ditunjukkan dengan garis ungu, dan hasil dari *Geo Studio Seep/w 2012* ditunjukkan dengan garis biru. Untuk perbandingan gambar pola aliran rembesan dapat dilihat pada gambar 5 hingga gambar 11.



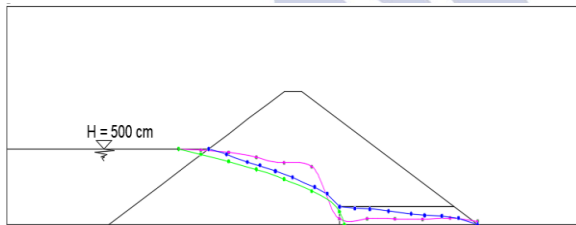
Gambar 5. Perbedaan Pola Aliran Rembesan Ketinggian 800 cm (skala model 20 cm)
Sumber : Hasil Perhitungan



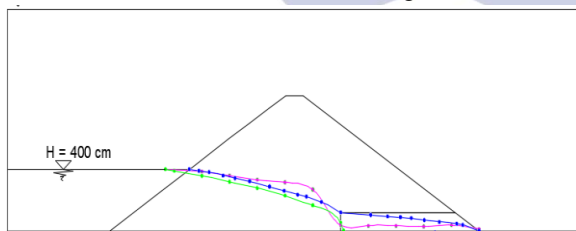
Gambar 6. Perbedaan Pola Aliran Rembesan Ketinggian 700 cm (skala model 17,5 cm)
Sumber : Hasil Perhitungan



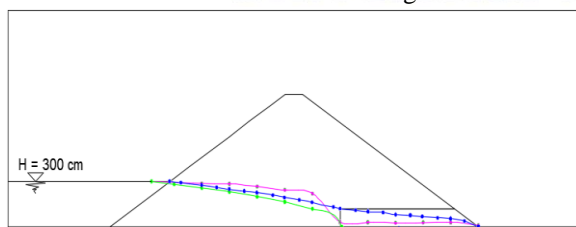
Gambar 7. Perbedaan Pola Aliran Rembesan Ketinggian 600 cm (skala model 15 cm)
Sumber : Hasil Perhitungan



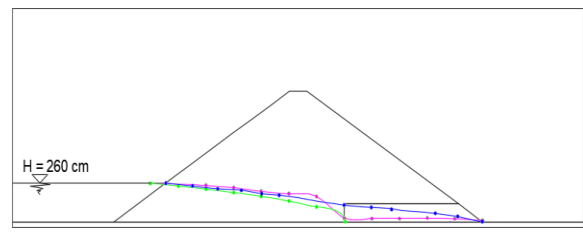
Gambar 8. Perbedaan Pola Aliran Rembesan Ketinggian 500 cm (skala model 12,5 cm)
Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 9. Perbedaan Pola Aliran Rembesan Ketinggian 400 cm (skala model 10 cm)
Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 10. Perbedaan Pola Aliran Rembesan Ketinggian 300 cm (skala model 7,5 cm)
Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 11. Perbedaan Pola Aliran Rembesan Ketinggian 260 cm (skala model 6,5 cm)
Sumber : Hasil Perhitungan

Keterangan gambar:

- = Pola Aliran Rembesan dari Geo Studio Seep/w 2012 Student Version
- = Pola Aliran Rembesan dari Empiris
- = Pola Aliran Rembesan dari *Casagrande*

Berdasarkan gambar pola aliran rembesan diatas, setiap pola aliran rembesan menurut ketiga metode memiliki hasil yang berbeda - beda. Pola aliran rembesan menggunakan aplikasi Geo Studio Seep/w 2012 dengan pola aliran rembesan menggunakan metode *Casagrande* menunjukkan bahwa kedua pola ini saling berimpit. Sedangkan hasil pola aliran rembesan berdasarkan hasil pengamatan laboratorium (empiris) dapat dilihat pada gambar terdapat perbedaan yang menonjol dari kedua metode lainnya. Hal ini disebabkan oleh kurangnya ketelitian pada pembacaan pipa piezometer pada alat model fisik. Hasil yang didapatkan lebih tinggi dibanding metode *Casagrande* maupun Geo Studio Seep/w 2012. Penggambaran pola aliran rembesan dari hasil empiris didapat dari data pengamatan ketinggian air di piezometer pada kondisi terakhir pengamatan yakni selama 24 jam.

Pada pola aliran rembesan pada uji model fisik, metode *Casagrande*, dan *software* Geo Studio 2012 memiliki titik akhir pola aliran rembesan yang berbeda. Untuk metode *Casagrande* titik akhir pola aliran rembesan tidak mencapai lereng hilir tubuh bendungan. Sedangkan pada uji model fisik dan *software* Geo Studio 2012 dapat menggambarkan pola aliran hingga memotong tubuh hilir bendungan. Pada uji model fisik juga tidak dapat menggambarkan titik awal pola aliran rembesan yang sama dengan metode *Casagrande*, dan *software* Geo Studio 2012. Hal ini disebabkan karena, pada alat uji model fisik terdapat pipa piezometer yang telah terpasang dan tidak dapat dirubah letak pipa piezometer tersebut. Sehingga dapat mempengaruhi ketinggian tekanan air setiap metode yang digunakan.

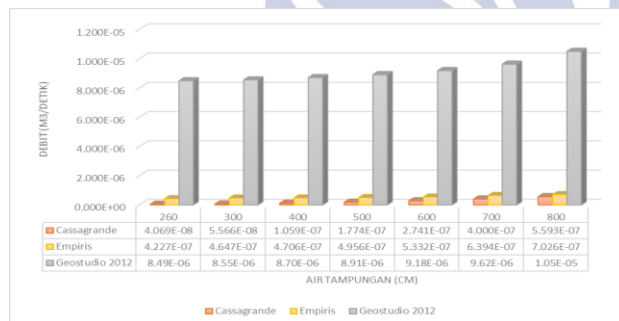
C. Hubungan Ketinggian Air dengan Debit Rembesan

Perhitungan debit menggunakan metode *Casagrande* telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Berikut ini adalah rekapitulasi besarnya debit empiris, debit *Casagrande* dan debit Geo Studio seep/w 2012 yang dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3 Rekapitulasi Debit Rembesan

Debit	Air Tampung (cm)						
	260	300	400	500	600	700	800
Geo Studio	8.49 E-06	8.55 E-06	8.70 E-06	8.91 E-06	9.18 E-06	9.62 E-06	1.05 E-05
Casagrande	4.07 E-08	5.57 E-08	1.06 E-07	1.78 E-07	2.74 E-07	4.00 E-07	5.59 E-07
Empiris	4.23 E-07	4.65 E-07	4.71 E-07	4.96 E-07	5.33 E-07	6.39 E-07	7.03 E-07

Pada setiap metode perhitungan, baik menggunakan metode *Casagrande*, metode empiris ataupun metode Geo Studio 2012 memiliki besaran debit rembesan yang berbeda - beda. Hasil perhitungan yang berbeda - beda ini disebabkan oleh setiap metode memiliki pertimbangan akan karakteristik dengan kelebihan dan kekurangan masing - masing metode.



Grafik 1. Perbandingan Debit Rembesan Air

Hasil dari perhitungan menggunakan metode *Casagrande* memiliki nilai yang relatif kecil dibandingkan dengan kedua metode lainnya. Hal ini antara lain disebabkan dalam perhitungan menggunakan metode tersebut selain memperhitungkan koefisien permeabilitas dan tinggi air tampung juga memperhitungkan panjang zona basah (a) dalam perhitungan debitnya.

Untuk hasil perhitungan menggunakan pemodelan fisik di laboratorium (empiris), debit yang dihasilkan tiap ketinggian mengalami kenaikan, meskipun relatif kecil. Faktor utama yang menyebabkan hal ini terjadi adalah faktor alat dan kesalahan peneliti. Faktor alat yang menyebabkan perbedaan ini karena peralatan yang digunakan dalam penelitian ini masih memiliki kekurangan dalam ketelitian dan kemungkinan adanya kesalahan peneliti dalam hal proses pemadatan tanah

timbunan dan pembacaan debit rembesan yang kurang tepat.

Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi air tampung pada bagian hulu bendungan, maka semakin besar pula debit rembesan yang terjadi di bagian hilir bendungan. Sebaliknya, semakin rendah tinggi air tampung, maka semakin kecil pula debit rembesan yang terjadi di bagian hilir bendungan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya, maka dapat disimpulkan antara lain berikut ini:

1. Dari hasil penelitian, pola rembesan air yang terjadi pada bendungan tipe urugan homogen dengan kemiringan 30 derajat memiliki pola yang berbeda setiap metodenya. Metode *Casagrande* dan metode Geo Studio Seep/w 2012 memiliki pola rembesan air yang hampir sama. Berbeda dengan metode empiris (model fisik) yang memiliki pola aliran yang lebih tinggi dibandingkan kedua metode.
2. Dari perhitungan diatas, dapat disimpulkan semakin tinggi muka air tampung di bagian hulu maka debit *outflow* yang dihasilkan akan lebih besar. Ketinggian muka air tampung 800 cm (skala model 20 cm) menghasilkan debit *outflow* yang paling besar dari masing - masing metode perhitungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andjani, N. (2005). *Petunjuk Praktikum Mekanika Tanah II*. Surabaya: State University of Surabaya Press.
- Anonim. (1990). *SNI 1968-1990 : Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Anonim. (1992). *SNI 03-2828-1992 : Metode Pengujian Kepadatan Lapangan dengan Alat Konus Pasir*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Anonim. (2003). *Pedoman Kriteria Umum Desain Bendungan*. Jakarta: Balai Keamanan Bendungan.
- Anonim. (2008). *SNI 1742-2008 : Cara Uji Kepadatan Ringan Untuk Tanah*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- Anonim. (2008). *SNI 1964-2008 : Cara Uji Berat Jenis Tanah*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Anonim. (2008). *SNI 2435-2008 : Cara Uji Kelulusan Air Benda Uji Tanah di Laboratorium Dengan Tekanan Tetap*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Anonim. (2014). *Pedoman Penulisan Skripsi*. Surabaya: State University of Surabaya.
- Anonim. (2015). *SNI 8062-2015 : Tata-Tata Cara Desain Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Anonim. (2016). *SNI 8064-2016 : Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Aswin, M. (2018). Kajian Garis Freatis Pada Tubuh Bendungan Urugan Untuk Mengatasi Rembesan Berdasarkan Kepadatan Tanah Menggunakan Aplikasi Geostudio Seep/w 2012. *Jurnal Teoritis Pengairan Universitas Brawijaya* Vol 2:1.
- Bowles, J. E. (1989). *Sifat-Sifat Fisis Tanah dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M. (1993). *Mekanika Tanah (Prinsip - Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- E., S. (2013). *Konsep dan Aplikasi Mekanika Tanah*. Yogyakarta: Andi.
- F., C. R. (1994). *Mekanika Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, H. C. (2006). *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Kusnan. (2017). Model Alat Rancang Bangun Untuk Menentukan Garis Aliran Rembesan Air (Seepage Line Formation) di Timbunan Tubuh Bendungan Tipe Urugan Homogen. *Jurnal Teknik* Vol 15:2.
- Ma'rifah, B. H. (2016). Pengaruh Pola Aliran Saluran Pelimpah Samping Akibat dari Penempatan Spillway dengan Tipe Mercu Ogee Waduk Wonorejo. *Skripsi tidak diterbitkan*, Surabaya : PPs Universitas Negeri Surabaya .
- Masrevaniah, A. (2010). *Konstruksi Bendungan Urugan*. Malang: CV. Asrori Malang.
- Ridwan, M. (2003). *Petunjuk Praktikum Mekanika Tanah I*. Surabaya: State University of Surabaya Press.
- Rizalihadi, M. A., & Yanita, L. (2013). Observasi Garis Freatis pada Model Bendungan Berdasarkan Kepadatan Tanah melalui Model Fisik. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil* Vol 20:1.
- Simatupang, T. M. (1995). *Pemodelan Sistem*. Klaten: Nindita.
- Soedibyo, I. (2003). *Teknik Bendungan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, T. K. (1981). *Bendungan Type Urugan*. Jakarta: Pt. Pradnya Paramita.
- Sukirman, S. d. (2014). Analisis Rembesan pada Bendung Tipe Urugan Melalui Uji Hidrolik di Laboratorium Hidro FT UNSRI. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, Vol 2 No 2 hal 1-7.
- <http://www.geoslope.com>